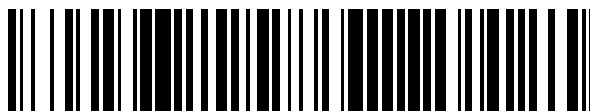


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 727 347**

51 Int. Cl.:

**H01L 29/32** (2006.01)

**H01L 29/36** (2006.01)

**H01L 29/778** (2006.01)

**H01L 29/20** (2006.01)

**H01L 29/205** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.04.2015 PCT/EP2015/097004**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.10.2015 WO15150582**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.04.2015 E 15713536 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.02.2019 EP 3127160**

54 Título: **Capa tampón optimizada para transistor con efecto de campo de alta movilidad**

30 Prioridad:

**04.04.2014 FR 1400825**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**15.10.2019**

73 Titular/es:

**THALES (50.0%)**  
**Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade Nord**  
**92400 Courbevoie, FR y**  
**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET**  
**AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**JACQUET, JEAN-CLAUDE;**  
**AUBRY, RAPHAËL;**  
**GAMARRA, PIERO;**  
**JARDEL, OLIVIER y**  
**PIOTROWICZ, STÉPHANE**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 727 347 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Capa tampón optimizada para transistor con efecto de campo de alta movilidad

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere a transistores con efecto de campo de alta movilidad electrónica denominados transistores HEMT (acrónimo de la expresión anglosajona "High Electron Mobility Transistor").

La presente invención se refiere, más particularmente, a los apilamientos a partir de los cuales se fabrican los transistores HEMT utilizados como un amplificador de bajo ruido o de potencia, como conmutador o como oscilador y que cubren la gama de frecuencia comprendida típicamente entre 1 MHz y 100 GHz.

**Estado de la técnica**

10 La figura 1 representa esquemáticamente un corte de la estructura de un sistema de transistor HEMT elemento tradicional, en un plano Oxz, realizado sobre un sustrato 11. Tradicionalmente se utiliza un sustrato 11 aislante o semiconductor, por ejemplo que comprende silicio (Si), carburo de silicio (SiC) o zafiro ( $Al_2O_3$ ), en el que se realiza un apilamiento según el eje z de al menos dos capas de semiconductor que se extienden en el plano Oxy.

15 Una primera capa 12, denominada capa tampón, o "buffer" (término utilizado en la bibliografía anglosajona), presenta una banda prohibida ancha (material semiconductor llamado de gran brecha) por ejemplo que comprende un material compuesto binario de nitrógeno, tal como GaN o un material a base de compuesto ternario de nitruro de elementos III, denominado III-N, tal como AlGaN, o más exactamente  $Al_xGa_{1-x}N$ .

20 Una segunda capa, denominada capa barrera 13, presenta una banda prohibida más grande que la de la capa tampón 12. Esta capa comprende un material a base de compuesto cuaternario, ternario o binario de nitruro de elementos III, denominado III-N, a base de Al, Ga, In o B.

Por ejemplo, con una capa tampón de GaN, la capa barrera comprende  $Al_xGa_{1-x}N$  o  $In_{1-x}Al_xN$ , o una secuencia  $In_{1-x}Al_xN/AlN$  o  $Al_xGa_{1-x}/AlN$ .

Según el contenido x de aluminio, las anchuras de bandas prohibidas de  $Al_xGa_{1-x}N$  y de  $In_{1-x}Al_xN$  varían de 3,4 eV (GaN) a 6,2 eV (AlN) y de 0,7 eV (InN) a 6,2 eV (AlN) respectivamente.

25 El espesor de la capa barrera 13 está normalmente comprendido entre 5 nm y 40 nm, el espesor de la capa tampón 12 está normalmente comprendido entre 0,2  $\mu m$  y 3  $\mu m$ .

Capas suplementarias pueden estar presentes bien en superficie, o bien entre la capa tampón y la capa barrera.

30 La capa tampón 12 y la capa barrera 13 se realizan tradicional por epitaxia por MOCVD o por MBE. A modo de ejemplo, se puede citar una capa tampón a base de GaN con una capa barrera a base de AlGaN o de InAlN, y más exactamente a base de  $Al_xGa_{1-x}N$  o de  $In_zAl_{1-z}N$ , con x comprendido normalmente entre el 15 % y el 35 % y z comprendido normalmente entre el 15 % y el 25 %.

La unión entre la capa tampón y la capa barrera constituye una heterounión 15 que se extiende también en el plano Oxy. El origen O de las coordenadas Oxyz se elige en este plano.

35 Un transistor HEMT comprende tradicionalmente una fuente S, un drenaje D y una rejilla G depositados sobre la cara superior 14 de la capa barrera 13.

La rejilla G se deposita entre la fuente S y el drenaje D y permite controlar el transistor. La conductancia entre la fuente S y el drenaje D está modulada por la acción electrostática de la rejilla G, tradicionalmente de tipo Schottky o de tipo MIS para (metal/aislante/semiconductor), y la tensión  $V_{GS}$  aplicada entre la rejilla y la fuente controla el transistor.

40 Un gas bidimensional de electrones 9 (denominado 2DEG para "two-Dimensional Electron Gas") está localizado en las inmediaciones de la heterounión 15. Estos electrones son móviles en el plano Oxy y tienen una fuerte movilidad electrónica  $\mu_e$ , normalmente superior a 1000  $cm^2/Vs$ . En un funcionamiento normal del transistor, estos electrones no pueden circular en la dirección z ya que están confinados en el pozo de potencial que se forma en el plano Oxy en las inmediaciones de la heterounión 15. El gas de electrones 9, confinado en lo que se denomina el canal del transistor, es, por lo tanto, capaz de transportar una corriente  $I_{DS}$  que circula entre el drenaje y la fuente. Tradicionalmente, se aplica una diferencia de potencial  $V_{DS}$  entre la fuente S y el drenaje D, con normalmente una fuente S conectada a masa, y el valor de la corriente  $I_{DS}$  está en función de la tensión aplicada  $V_{GS}$  entre la rejilla G y la fuente S.

45 El efecto transistor está basado en la modulación de la conductancia  $g_m$  entre los contactos S y D por la acción electrostática del electrodo de control G. La variación de esta conductancia es proporcional al número de portadores libres en el canal, y, por lo tanto, a la corriente entre fuente y drenaje. Es el efecto de amplificación de transistor el que permite transformar una señal débil aplicada sobre la rejilla en una señal más fuerte recuperada en el drenaje.

La figura 2 representa la distribución de las cargas en las inmediaciones de la heterounión. Los materiales de la familia de los III-N son fuertemente electronegativos. Cuando se ponen en contacto dos compuestos diferentes de esta familia, una carga eléctrica fija que puede ser positiva ( $\sigma^+$ ) (figura 2) o negativa ( $\sigma^-$ ) aparece en su interfaz. Esta carga fija atrae cargas móviles (electrones cuando es positiva tal como en la figura 2 u orificios cuando es negativa). Son estas cargas móviles en las que crean una corriente cuando se aplica una tensión entre el drenaje y la fuente.

El GaN es un semiconductor que, en las condiciones de crecimiento habituales, está dopado con impurezas de tipo donador (N) (normalmente lagunas de nitrógeno). Este tipo de defectos no permite obtener un confinamiento de los electrones en el canal cuando la tensión aplicada al drenaje del transistor se vuelve demasiado grande (normalmente superior a 10 V y cuando la longitud de la rejilla  $L_g$  se vuelve demasiado corta (normalmente inferior a 0,25  $\mu\text{m}$ ). Los electrones circulan entonces en la capa tampón lo que tiene la consecuencia de una disminución de la conductancia  $g_m$  del transistor.

Este mal confinamiento de los electrones en el canal se traduce en la característica de transferencia  $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$  por una disminución de la pendiente  $g_m = \Delta I_{DS} / \Delta V_{GS}$  tal como se ilustra en la figura 3. Esta disminución indica una menor eficacia para modular la corriente por la rejilla.

Un buen funcionamiento del transistor se obtiene cuando la curva 31  $\text{Log}(I_{DS}) = f(V_{GS})$ , a  $V_{DS}$  constante elevada (por ejemplo 20 V) y para una rejilla corta (por ejemplo inferior a 0,25  $\mu\text{m}$ ), presenta una pendiente pronunciada, tal como se ilustra en la figura 3. Esta pendiente pronunciada caracterizada por una transconductancia  $g_m$  elevada traduce la capacidad del transistor para modular corrientes fuertes con una ganancia de potencia suficiente en el punto de funcionamiento 30. En este caso se dice que el "estrangulamiento" del transistor es bueno. La curva 32 ilustra un transistor que presenta un mal "estrangulamiento". Es posible cuantificar este valor mediante una magnitud llamada 'Subthreshold Slope' en la bibliografía anglosajona o pendiente antes del umbral de estrangulamiento en francés. Se busca un valor de esta inferior a 150 mV/década de corriente.

Para obtener un funcionamiento del transistor con una pendiente antes del umbral de estrangulamiento inferior a 150 mV/década para las tensiones de funcionamiento deseadas es necesario compensar el dopaje con N inicial.

Una primera solución es dopar con P el "buffer" ( $\text{GaN}$  o  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) introduciendo impurezas de tipo aceptor, por ejemplo por modificación de las condiciones de epitaxia o por adición durante el crecimiento de impurezas de tipo aceptor. La densidad de impurezas introducida en el "buffer" está optimizada para obtener el comportamiento transistor deseado.

Las impurezas compatibles son principalmente carbono y hierro pero también pueden ser magnesio, berilio o zinc o cualquier impureza conocida por ser un centro aceptor en GaN. Normalmente un exceso de impurezas de tipo P con respecto a las impurezas de tipo N de varios  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  a varios  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  permite obtener una pendiente antes del umbral de estrangulamiento inferior a 150 mV/década para tensiones de funcionamiento máximas de 50 V ( $V_{DS}$ ) y rejillas de 0,15  $\mu\text{m}$  de largo.

Estas impurezas constituyen, no obstante, centros profundos. Se llama centro profundo una impureza cuyo nivel de energía está situado a más de 2 a 3 veces la energía de activación térmica ( $= 3/2 k_b \cdot T$ ) del mínimo de la banda de conducción para una impureza de tipo N o del máximo de la banda de valencia para una impureza de tipo P. A temperatura ambiente la energía de activación térmica es del orden de 40 meV. Por lo tanto, un centro será considerado como profundo cuando esté situado a más de 100 meV de uno de estos extremos, el cual es el caso para GaN dopado con impureza de tipo aceptor.

Estos centros se cargan negativamente cuando el transistor se conecta a la tensión y, como son profundos, no se descargan a las frecuencias de funcionamiento superiores al MHz. Esto tiene el efecto de reducir la carga móvil presente en el canal conductor, lo que reduce la corriente y aumenta la resistencia de acceso. De ello se deduce que este enfoque tiene como principal inconveniente, además de generar dispersión, reducir el rendimiento del transistor y la potencia que este puede emitir. Esta degradación de las prestaciones es tanto más pronunciada cuanto más elevada es la tensión  $V_{DS}$  de funcionamiento del transistor (normalmente superior a 20 V).

Esta disminución de la carga móvil, denominada "current collapse" en terminología anglosajona se ilustra en la figura 4. En este ejemplo el buffer del transistor en GaN está dopado con P uniformemente a un valor de  $5 \cdot 10^{17} \text{ átomos/cm}^3$ .

La curva 40 ilustra una característica de corriente/tensión de un transistor (realizada a  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ) que no se ha conectado a tensión previamente al establecimiento de la característica.

La curva 41 ilustra una característica de corriente/tensión del transistor (realizada a  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ) que se ha sometido a un esfuerzo en forma de una tensión  $= V_{GS} = -6 \text{ V}$  y  $V_{DS} = 40 \text{ V}$ , previamente al establecimiento de la característica.

Se constata que en la curva 41  $I_{DS}$  en función de  $V_{DS}$  se modifica con respecto a la curva 40 inicial. La característica corriente/tensión se degrada, con, en este ejemplo una variación relativa del 60 % de la corriente  $I_{DS}$  (y, por lo tanto, de la potencia disponible) a una tensión  $V_{DS}$  de 5 V.

Una segunda solución es realizar un buffer compuesto de  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  por ejemplo, tal como se ilustra en la figura 5, con el canal de GaN. En este caso la carga piezoeléctrica negativa apareciendo en la interfaz 50  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

crea una barrera de potencial que permite confinar los electrones en el canal. Cierta porción de aluminio en la capa de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (normalmente del 3 % al 10 %) es necesario para obtener un buen confinamiento de los electrones para una tensión de funcionamiento máxima comprendida entre 20 V y 40 V y una longitud de rejilla inferior a 0,25  $\mu\text{m}$ .

- 5 No obstante, la conductividad térmica de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  es inferior a la de GaN en un factor comprendido entre 3 y 5 para las tasas de aluminio necesarias para un buen confinamiento de los electrones. La resistencia térmica del transistor está, de este modo, fuertemente degradada, multiplicada por de 2 a 3, y pudiendo emitirse la potencia reducida en un factor de 1,5 a 3 (según las aplicaciones previstas) con esta solución.

El documento US2013/0328106 describe un transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica.

- 10 Un objetivo de la invención es paliar los inconvenientes mencionados anteriormente proponiendo un apilamiento optimizado para transistor HEMT, que permite al transistor HEMT realizado a partir de este apilamiento presentar buenas características de corriente/tensión, que se traducen en un buen confinamiento de los electrones en el canal y una baja dispersión de corriente, incluyendo cuando el transistor debe funcionar a alta frecuencia (pequeñas dimensiones de rejilla) o a tensiones de drenaje  $V_{\text{DS}}$  elevadas.

### **Descripción de la invención**

- 15 Más exactamente, la invención tiene por objeto un apilamiento según un eje z para transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica según la reivindicación 1.

Preferentemente, las impurezas de tipo aceptor son carbono o hierro o magnesio.

Preferentemente, la densidad volúmica de cargas negativas fijas en el equilibrio termodinámico es sustancialmente igual a la densidad volúmica de impurezas de tipo aceptor introducidas en dicha zona de la capa tampón.

- 20 Preferentemente, la densidad volúmica de cargas negativas fijas es superior o igual a  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , el espesor de la zona es inferior o igual a 40 nm, el producto de la densidad volúmica de cargas negativas fijas por el espesor de la zona es inferior o igual a  $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , y estas cargas están situadas a una distancia de la heterounión inferior o igual a 40 nm. Preferentemente, el primer material semiconductor comprende GaN. Preferentemente, el segundo material semiconductor comprende AlN, AlGaIn, InAlN, InGaAlN o B GaAlN.

- 25 Según una variante, la densidad volúmica de cargas negativas fijas presenta un perfil según el eje z en forma de almendra.

Según otra variante, la densidad volúmica de cargas negativas presenta un perfil según el eje z trapezoidal que presenta una primera pendiente creciente y después un valor constante y después una segunda pendiente decreciente.

- 30 Según otra variante, la densidad volúmica de cargas negativas fijas presenta un perfil según el eje z en forma de campana.

Según una realización, la capa tampón es compuesta, y comprende una primera capa tampón a base de material GaN y una segunda capa tampón a base de material AlGaIn, estando la zona Vf comprendida en la primera capa tampón.

Según otro aspecto, la invención tiene por objeto un transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica realizado a partir de un apilamiento según la invención.

- 35 Según una realización, el transistor presenta una longitud de rejilla  $L_g$  y la distancia a la heterounión de la zona es inferior o igual a la longitud de rejilla  $L_g$ .

Preferentemente, el producto de la densidad volúmica de cargas negativas fijas por el espesor de la zona cumple la siguiente relación:

$$[Fv].t = (1 \pm 0,3) \times 10^3 \text{ v } V_{\text{DSMAX}} / L_g$$

- 40 en la que:

$L_g$  es la longitud de rejilla del transistor, en nm

$V_{\text{DSMAX}}$  es la tensión máxima aplicada entre la fuente y el drenaje del transistor, en Voltios,

$[Fv].t$  se expresa en  $\text{cm}^{-2}$ .

- 45 Otras características, objetivos y ventajas de la presente invención aparecerán al leer la descripción detallada que sigue y con referencia a los dibujos adjuntos que se dan a modo de ejemplos no limitantes y en los que:

- la figura 1 ya citada representa esquemáticamente un corte de la estructura de un transistor HEMT tradicional,
- la figura 2 ya citada representa la distribución de las cargas en las inmediaciones de la heterounión del transistor HEMT tradicional,
- la figura 3 ya citada representa esquemáticamente la característica corriente/tensión de un transistor HEMT que presenta un buen y un mal "estrangulamiento",

50

- la figura 4 ya citada ilustra esquemáticamente el comportamiento de un transistor HEMT según el estado de la técnica que presenta una dispersión de corriente,
- la figura 5 ya citada ilustra esquemáticamente un apilamiento de un transistor según un estado de la técnica que presenta una capa tampón compuesta,
- 5 - la figura 6 ilustra un apilamiento para transistor con efecto de campo según la invención,
- la figura 7 describe más exactamente la estructura de las cargas en el apilamiento según la invención,
- la figura 8 ilustra diferentes formas de perfil de densidad volumétrica de cargas negativas fijas según la invención,
- la figura 9 esquematiza la diferencia entre el perfil de impurezas introducidas y el perfil de impurezas cargadas para tres valores de distancia d entre la zona Vf y la heterounión,
- 10 - la figura 10 ilustra la característica  $\text{Log}[I_{DS}] = f(V_{GS})$  para un transistor HEMT realizado con el apilamiento según la invención, para tres valores de distancia d entre la zona Vf y la heterounión,
- la figura 11 ilustra la dispersión de corriente para tres valores de distancia d entre la zona Vf y la heterounión,
- la figura 12 esquematiza la diferencia entre el perfil de impurezas introducidas y el perfil de impurezas cargadas para tres valores de espesor t de la zona Vf,
- 15 - la figura 13 ilustra una variante del apilamiento según la invención que presenta una capa tampón compuesta.

### **Descripción detallada de la invención**

La figura 6 ilustra un apilamiento 10 para transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica (HEMT) según la invención.

El apilamiento 10 según la invención se realiza a partir de un sustrato 11 tradicional para este tipo de componente.

- 20 El apilamiento 10 comprende una pluralidad de capas según un plano xy perpendicular a un eje z. Por convención, el apilamiento se denomina "según el eje z".

El apilamiento 10 comprende una capa tampón 12 que comprende un primer material semiconductor que comprende un compuesto binario o ternario de nitruro y que presenta una primera banda prohibida. El primer material semiconductor se denomina "gran brecha" según la terminología tradicional.

- 25 Preferentemente, el primer material semiconductor comprende GaN. Como variante comprende AlGa<sub>N</sub>, más exactamente Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, con x comprendido normalmente entre el 1 % y el 35 %. La capa tampón se deposita sobre el sustrato 11. El espesor de esta capa es suficiente para garantizar una buena calidad cristalina del material a la interfaz con la capa barrera donde se forma el canal conductor.

- 30 El apilamiento comprende también una capa barrera 13 que comprende un segundo material semiconductor que comprende un compuesto binario, o ternario, o cuaternario de nitruro y que presenta una segunda banda prohibida.

Según una variante, la capa barrera comprende AlN.

Según una segunda variante, preferentemente, la capa barrera comprende AlGa<sub>N</sub> o InAlN, y más exactamente Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N o In<sub>y</sub>Al<sub>1-y</sub>N con x comprendido normalmente entre el 15 % y el 35 % e y comprendido normalmente entre el 15 % y el 25 %.

- 35 Según una tercera variante, la capa barrera comprende BAIGa<sub>N</sub> o InGaAlN.

La segunda banda prohibida es superior a la primera banda prohibida, según la estructura tradicional de un apilamiento para transistor HEMT.

- 40 El apilamiento presenta una heterounión 15 entre la capa tampón 12 y la capa barrera 13 y un gas bidimensional de electrones 9 localizado en un plano xy perpendicular al eje z y en las inmediaciones de la heterounión 15, según la estructura tradicional de un apilamiento para transistor HEMT. Preferentemente los materiales de las capas tampón 12 y barrera 13 son semiconductores tradicionalmente utilizados para la fabricación de un transistor HEMT a base de galio (Ga).

Se pueden insertar capas intermedias entre la capa tampón y el sustrato, o entre la capa tampón y la capa barrera, pero no se describen en el presente documento en aras de la simplificación.

- 45 La capa tampón 12 del apilamiento según la invención presenta una estructura particular optimizada para la mejora de las prestaciones de los transistores HEMT realizados a partir del apilamiento 10 según la invención, mediante depósito de estructuras de rejillas, de fuentes y de drenajes según el estado de la técnica de los transistores HEMT.

- 50 La capa tampón 12 del apilamiento según la invención comprende una zona Vf que comprende cargas negativas fijas localizadas en un lugar específico de la capa tampón. Se entiende por cargas negativas fijas cargas no móviles (cargas móviles en este contexto significa electrones u orificios), entendiéndose el término móvil en el sentido habitual en el campo de la física de los semiconductores. La zona Vf se extiende según el plano xy, está situada a una distancia d de la heterounión y presenta un espesor t.

La figura 7 describe, más exactamente, la distribución y la naturaleza de las cargas en el apilamiento según la

invención. El carácter fijo de una carga se simboliza mediante un rectángulo que rodea a esta carga, mientras que el carácter móvil se simboliza mediante un óvalo.

5 Como se ha descrito anteriormente, debido a un efecto piezoeléctrico, una densidad superficial  $\sigma^+$  de cargas positivas fijas 71 está presente en las inmediaciones de la heterounión, y cargas negativas móviles em también situadas próximas a la heterounión constituyen el gas bidimensional de electrones en el origen del funcionamiento del transistor HEMT. La densidad superficial de electrones em en el canal es normalmente de aproximadamente  $0,5$  a  $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .

La zona Vf del apilamiento según la invención comprende cargas negativas fijas 70.

Estas cargas negativas fijas presentan una densidad volúmica [Fv] tradicionalmente expresada en  $\text{cm}^{-3}$ .

10 Después de numerosos experimentos y simulaciones, los inventores determinaron intervalos de parámetros [Fv], y t de la zona Vf para los cuales el transistor HEMT, realizado en el apilamiento como se ha descrito anteriormente, presenta un buen funcionamiento, particularmente un buen "estrangulamiento" y una baja dispersión de corriente ("lag"). La obtención de un buen funcionamiento significa también que los inconvenientes vinculados a los apilamientos según el estado de la técnica tales como: disminución de la potencia emitida, bajada del rendimiento, reducción de la linealidad... se reducen, incluso se suprimen.

15 La idea general de la invención es introducir en la capa tampón 12 la carga eléctrica negativa fija que es justamente necesaria para la obtención de buenas características de transferencia a las tensiones y a las frecuencias de funcionamiento deseadas. El control de la cantidad de cargas y de su posición con respecto al gas 2D de electrones permite:

- 20 - obtener un buen confinamiento de los electrones en el canal sin crear fenómenos de captura indeseables que conllevan una degradación de la linealidad (efectos dispersivos) y una disminución de la potencia disponible y del rendimiento,
- sin degradar la conductividad térmica del "buffer", por ejemplo de GaN.

Los parámetros [Fv] y t están conectados a magnitudes físicas que intervienen en el funcionamiento del transistor HEMT realizado a partir del apilamiento 10 según la invención.

25 Una primera magnitud física es el campo eléctrico E creado debido a la existencia de la zona Vf.

El campo eléctrico E según el eje z Ez creado entre la heterounión 15 y la zona Vf cumple la relación:

$$\text{div}Ez = q \cdot [Fs] / \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

con: q carga del electrón,  $\epsilon_0$  permitividad dieléctrica del vacío,  $\epsilon_r$  permitividad relativa de la capa tampón, [Fs] densidad superficial de cargas negativas "vistas" por las cargas móviles em del canal (expresada en  $\text{cm}^{-2}$ ). Tenemos:

30 
$$[Fs] \approx [Fv] \cdot t$$

La presencia del campo eléctrico Ez creado por la zona Vf de cargas negativas tiene el efecto de confinar los electrones en el canal, lo que permite obtener un "buen estrangulamiento".

De este modo, para que este campo Ez sea suficiente para confinar los electrones, los inventores han demostrado que las magnitudes [Fv] y t deben estar comprendidas en los intervalos siguientes:

35 
$$[Fv] \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$t \leq 200 \text{ nm}$$

$$10^{12} \text{ cm}^{-2} \leq [Fv] \cdot t \leq 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$$

El parámetro [Fv].t representa la dosis de cargas negativas, que debe ser óptima y estar dispuesta próxima a la interfaz 15.

40 Una ventaja de la invención es que la localización y la dosis de las cargas negativas introducidas permite introducir la cantidad de carga que es justamente necesaria para el confinamiento de los electrones (dependiendo esta cantidad, además, de la tensión de funcionamiento y de la longitud de rejilla como se describe más adelante), al tiempo que se limita la pérdida de potencia con respecto a un enfoque según el cual la totalidad del buffer está "dopado" con impurezas de tipo aceptor.

45 Los intervalos reivindicados también deben respetarse para garantizar una baja dispersión de la corriente, como se describe más adelante.

El perfil de densidad volúmica de cargas negativas fijas según el eje z puede ser de cualquier forma, no teniendo la forma ningún efecto de primer orden sobre los efectos físicos implicados.

La figura 7 ilustra un perfil en forma de almena de valor constante  $Fv0$ .

El valor mínimo  $Nr$  corresponde a la densidad de cargas negativas fijas residuales en la capa tampón 12, para una capa tampón llamada "compensada" según el estado de la técnica. En este caso, la capa tampón en su conjunto presenta un exceso de concentración de impurezas de tipo aceptor con respecto a la concentración de impurezas de tipo donador superior a  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , correspondiente a la densidad residual  $Nr$ .

La figura 8 (8a a 8d) ilustra diferentes formas de perfil de densidad volúmica  $[Fv]$  según la invención.

La figura 8a ilustra un perfil trapezoidal que presenta una primera pendiente creciente 81 y después un valor constante  $Fv0$  y después una segunda pendiente decreciente 82. La figura 8b ilustra un perfil que presenta una primera pendiente creciente, un valor constante y una segunda pendiente abrupta. La figura 8c ilustra un perfil que presenta una primera pendiente abrupta, un valor constante y una segunda pendiente decreciente. La figura 8d ilustra un perfil en campana.

El apilamiento 10 según la invención puede presentar cualquier otro tipo de perfil que presenta una densidad de cargas volúmica localizada en un espesor  $t$  que cumple las condiciones anteriores. Para un perfil cualquiera, el espesor  $t$  se puede evaluar a media altura entre el valor máximo y el valor residual. La distancia  $d$  a la heterounión 15 se puede evaluar con respecto al punto 83 que corresponde al punto a media altura del lado de la heterounión 15.

Preferentemente, las cargas negativas fijas 70 localizadas en la capa tampón 12 se obtienen a partir de impurezas de tipo aceptor A introducidas en la capa tampón 12. Estos átomos de tipo aceptor son preferentemente carbono o hierro, o magnesio o berilio o cualquier tipo de impurezas conocidas por ser un centro aceptor en GaN o AlGaN.

Estas impurezas se introducen, por ejemplo, haciendo variar las condiciones de epitaxia de la capa tampón 12 o introduciendo voluntariamente estas impurezas durante el crecimiento de la capa tampón 12.

Estas impurezas A no realizan una función de dopaje en el sentido tradicional del término, ya que constituyen centros profundos.

Estas impurezas de tipo aceptor están en interacción de tipo electrostático con las cargas positivas fijas 71 que forman el plano de carga  $\sigma^+$  situado en las inmediaciones de la heterounión 15, y están más o menos ionizadas según su distancia  $d$  a esta heterounión 15 y a su posición en la banda prohibida del material que constituye la capa tampón.

Una segunda magnitud física que interviene para el funcionamiento del transistor HEMT realizado a partir del apilamiento según la invención es el parámetro  $\Delta$  definido como sigue, e ilustrado en la figura 9.  $\Delta = \int_0^t ([A] - [A^-]) \cdot dz$  (en  $\text{cm}^{-2}$ )

Con:

$[A]$  densidad volúmica de impurezas A (también denominadas defectos) de tipo aceptor introducidas en la capa tampón 12. Por lo tanto, tenemos  $[A] = [Fv]$ .

$[A^-]$  la densidad volúmica de impurezas llamadas "cargadas" o "ionizadas" por interacción electrostática (ionización de defecto que conlleva a la captura de un electrón por el centro profundo), correspondiendo cada impureza "cargada" a una carga negativa fija "inmovilizada" por interacción electrostática.

A continuación en el presente documento se explicará el significado físico de la magnitud  $\Delta$ , y para ello precisar el sentido del término "inmovilizado" y "no inmovilizado".

Un centro aceptor tiene dos estados posibles: bien está ocupado por un electrón y está entonces cargado negativamente, o bien está vacío y en este caso es neutro. La tasa de ocupación de estos centros (es decir, el número de centros ocupados por un electrón y, por lo tanto, la cantidad de carga negativa vinculada a estos centros) depende de las condiciones de utilización (frecuencia, temperatura y tensión). Esto tiene la consecuencia de que el nivel de potencia depende de las condiciones de utilización.

Al ser estas impurezas centros profundos, a las temperaturas de funcionamiento del transistor (25 °C a 250 °C normalmente), el tiempo necesario para que estos centros alcancen su estado de equilibrio es más largo que los tiempos característicos de funcionamiento del transistor (frecuencias de funcionamiento típico del orden de 1 GHz a 100 GHz que corresponden a tensiones que cambian periódicamente en 1 ns a 10 ps aproximadamente).

Por lo tanto, estos centros no responden inmediatamente a la señal aplicada. De ello se deduce que la carga negativa portada por estas impurezas y, por consiguiente, el nivel de corriente y de potencia depende del tiempo y de las diferentes tensiones aplicadas. Se observa, por lo tanto, una evolución de la señal a lo largo del tiempo independiente de la señal aplicada en el instante  $t$  que degrada la linealidad. No obstante, si estas impurezas están suficientemente próximas a la interfaz, entonces por interacción electrostática, una parte de estas impurezas (aquellas más próximas a esta interfaz) estarán cargadas sea cual sea la tensión aplicada al transistor. Su estado ya no dependerá entonces de las condiciones de utilización del transistor. Tendremos entonces menos efecto dispersivo y un funcionamiento más lineal del transistor. La magnitud  $\Delta$  cuantifica estos efectos dispersivos, esta representa la cantidad de cargas negativas fijas cuyo estado depende de las condiciones de utilización.

De este modo, en este contexto, el término "inmovilizado" significa que el estado del centro aceptor no depende de las condiciones de utilización, y el término "no inmovilizado" significa que el estado del centro aceptor depende de las condiciones de utilización.

- 5 La magnitud  $\Delta$  se define por la cantidad de impurezas, en este caso negativas, introducidas en la capa tampón para mejorar el estrangulamiento (y, por lo tanto, la ganancia del transistor) **menos** la cantidad de impurezas cuyo estado es "inmovilizado" por la presencia de la carga piezoeléctrica.  $\Delta$  representa, por lo tanto, el residual de impurezas no inmovilizadas cuyo estado de carga evolucionará a merced de las condiciones de utilización (temperatura, frecuencia, tensión). En otras palabras,  $\Delta$  representa el número de impurezas por unidad de superficie que no han capturado electrones (es decir "no inmovilizado") cuyo estado dependerá de las condiciones de utilización. Estos centros podrán, por lo tanto, potencialmente capturar un electrón, dependiendo la cantidad de centros aceptores que capturan un electrón, de las condiciones de utilización.

El perfil 91 (líneas continuas) en la figura 9 corresponde el perfil inicial [A], el perfil 92 (líneas discontinuas) corresponde al perfil [A].

La diferencia entre los dos perfiles corresponde a la superficie sombreada  $\Delta$  en la figura 9.

- 15 Las simulaciones para calcular el perfil [A-] se realizaron para tres valores de distancia  $d$  a la heterounión 15,  $d_1 = 25$  nm,  $d_2 = 75$  nm,  $d_3 = 140$  nm, y con las siguientes hipótesis:

Impurezas de tipo aceptor introducidas en la capa tampón con una densidad volúmica  $[A] = 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> y que forman una zona Vf que presenta un perfil en forma de almena y un espesor  $t = 40$  nm y cuyo nivel de energía  $E_T$  en la banda prohibida del material que constituye la capa tampón se encuentra en  $E_T = E_V + 0,9$  eV.

- 20 Además la longitud de rejilla  $L_g$  del transistor realizado en el apilamiento es en este ejemplo de 150 nm, que corresponde a una rejilla llamada "corta". Las diferentes aplicaciones previstas cubren tamaños de rejilla normalmente inferiores a 4  $\mu$ m. Los inventores han demostrado una dependencia de las prestaciones del transistor en función de la distancia  $d$  a la heterounión de la zona Vf, estando esta dependencia en función del tamaño de la rejilla  $L_g$ .

- 25 Durante la conexión a la tensión del transistor HEMT (en este ejemplo  $V_{GS} = -3$  V y  $V_{DS} = 40$  V), las impurezas no inicialmente cargadas ( $\Delta$ ) se cargarán. Durante un retorno a  $V_{GS} = -3$  V y  $V_{DS} = 40$  V al ser estas impurezas centros profundos permanecen cargadas a las frecuencias de funcionamiento del transistor. De este modo, las impurezas cuya carga negativa no está inmovilizada por el efecto electrostático tienen un estado que se modifica por aplicación de una tensión. Esta modificación provoca una variación de la corriente y, por lo tanto, de la potencia disponible (disminución o aumento según se aumente o se reduzca la tensión de polarización del transistor).

- 30 Se constata en la figura 9 que las cargas no inmovilizadas son cada vez más numerosas a medida que la zona Vf se aleja de la heterounión situada en el origen O. (por lo tanto mayor dispersión de la corriente).

Se destaca también que, para una distancia  $d$  dada, estas cargas aparecen en el lado opuesto al de la heterounión 15. En efecto, en el lado de la heterounión, las impurezas están más próximas a las cargas positivas fijas, por lo tanto, la interacción electrostática con la densidad superficial  $\sigma^+$  es mayor y permite inmovilizar el estado de las cargas.

- 35 En el ejemplo dado en la figura 9 (tensión máxima aplicada sobre el drenaje del transistor de 40 V), la simulación física indica:

$$\Delta_1 \approx 0,1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$\Delta_2 \approx 1,9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

$$\Delta_3 \approx 2,7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

- 40 La figura 10 ilustra la característica  $\text{Log}[I_{DS}] = f(V_{GS})$  para un transistor HEMT realizado con el apilamiento según la invención descrito anteriormente, para un punto de funcionamiento (llamado "quiescent point" en lenguaje anglosajón, indicado QP en el presente documento)  $I_{DS\_QP} = 100$  mA/mm ( $V_{GS\_MAX} = -6$  V en este ejemplo) y  $V_{DS\_QP} = 20$  V ( $V_{DS\_MAX} = 2 \times V_{DS\_QP} = 40$  V), para una zona Vf realizada según las tres distancias anteriores. Se constata que la característica es muy buena para  $d_1 = 25$  nm, un poco menos buena para  $d_2 = 75$  nm y mala para  $d_3 = 140$  nm.

- 45 La figura 11 ilustra la dispersión de corriente tal como se ha explicado anteriormente para los tres casos mencionados anteriormente. Se constata que esta dispersión aumenta cuando  $d$  aumenta.

De este modo para una rejilla "corta" de longitud  $L_g$  normalmente inferior a 200 nm, un buen funcionamiento del transistor se obtiene para una zona Vf situada a una distancia  $d < 100$  nm de la heterounión 15.

- 50 Para una distancia  $d$  muy grande, las cargas capturadas no inmovilizadas se vuelven más numerosas, y se observa un fenómeno análogo al constatado por los inventores para un dopaje P homogéneo en el conjunto de la capa tampón (mal estrangulamiento y dispersión de corriente). Una distancia  $d$  demasiado grande reduce también el campo eléctrico  $E_z$  de confinamiento de los electrones.



La figura 12 ilustra la evolución del parámetro  $\Delta$  en función del espesor  $t$  de la zona Vf que presenta un perfil en forma de almena con impurezas de tipo aceptor cuyo nivel de energía  $E_T$  en la banda prohibida del material que constituye la capa tampón se encuentra en  $E_T = E_V + 0,9 \text{ eV}$  y con una densidad volúmica  $[A] = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

5 Cuanto más aumenta el valor de  $t$  (de 38 nm a 90 nm) más aumenta el valor de  $\Delta$ . El valor de espesor  $t$  máximo para el cual el transistor conserva un buen funcionamiento está también en función de la densidad de impurezas introducidas  $[A]$  y de la distancia a la heterounión  $d$ .

De las consideraciones anteriores relativas a las figuras 9 a 12 se deduce que, para un funcionamiento lo más lineal posible del transistor realizado en el apilamiento según la invención, y para reducir la pérdida de potencia y de rendimiento del transistor, se busca minimizar el parámetro  $\Delta$ .

10 Un valor de  $\Delta$  próximo a 0 corresponde a la situación en la que la densidad superficial de cargas negativas fijas  $\int_0^t [A^-] \cdot dz$  es sustancialmente igual a la densidad superficial de impurezas de tipo aceptor  $\int_0^t [A] \cdot dz$  introducidas en la zona Vf de la capa tampón 12.

Una condición óptima corresponde a un valor de  $\Delta$  tal que:  
 $\Delta \leq 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

15 Para ello, una concentración volúmica  $[Fv]$  suficientemente elevada de impurezas se debe colocar a una distancia  $d$  suficientemente próxima a la interfaz 15 (para hacer el espesor  $t$  de esta capa lo más fino posible para un producto  $[Fv] \cdot t$  dado) para que todas las impurezas introducidas presenten cargas en un estado inmovilizado (todos los "dopantes" están ionizados y lo siguen estando para todas las condiciones de utilización). En esta situación, la dispersión temporal en la transconductancia  $g_m$  y la corriente se reduce, lo que representa una ventaja para las  
 20 aplicaciones en las que los aspectos de linealidad de la señal son importantes.

Esta condición se cumple, por ejemplo, para un apilamiento según la invención para transistor HEMT con:

$$[Fv] \geq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$t \leq 40 \text{ nm.}$$

$$[Fv] \cdot t \leq 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

25 y  $d \leq 40 \text{ nm}$ .

En primera aproximación esta condición preferente es independiente de la longitud de la rejilla  $L_g$  del transistor realizado a partir del apilamiento.

Según otro aspecto, la invención se refiere a un transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica realizado a partir de un apilamiento según la invención.

30 Además, como consecuencia de numerosos experimentos y simulaciones, los inventores dedujeron condiciones preferentes de dimensionamiento del transistor HEMT según la invención, es decir realizado a partir del apilamiento según la invención, en función de la aplicación deseada.

Durante el funcionamiento del transistor, una parte de las impurezas introducidas en el buffer para mejorar el "estrangulamiento" se carga negativamente. Estas cargas fijas corresponden a las impurezas que pasan de un estado  
 35 neutro (sin electrones capturados) a un estado cargado negativamente (captura de un electrón por el centro profundo). La cantidad de impureza que captura un electrón depende de las condiciones de utilización (temperatura, frecuencia, tensión) y de las características del perfil de estas impurezas ( $d$ ,  $t$  y  $[Fv]$ ).

Los inventores demostraron que un buen funcionamiento del transistor se obtiene preferentemente cuando la distancia  $d$  es inferior o igual a la longitud de la rejilla  $L_g$  del transistor según la invención:  $d \leq L_g$ .

40 Por simulación, se puede establecer una relación semiempírica que conecta la densidad superficial de cargas fijas (en  $\text{cm}^{-2}$ ) a realizar en el apilamiento, en función de la longitud de rejilla  $L_g$  y de la tensión máxima aplicada al drenaje  $V_{DSMAX}$ . Esta relación se validó por simulación para una densidad de electrones en el canal que llega hasta  $3 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ , para una longitud de rejilla  $L_g$  comprendida entre 50 nm y 4  $\mu\text{m}$ , y una tensión  $V_{DSMAX}$  que llega hasta varios kV (para las rejillas más largas) es decir:

45 
$$[Fv] \cdot t = [Fs_{opt}] = (1 \pm 0,3) \times 10^{13} \times V_{DSMAX} / L_g \quad (\text{relación n}^\circ 1)$$

con  $[Fs_{opt}]$  en  $\text{cm}^{-2}$ ,  $L_g$  en nm y  $V_{DSMAX}$  en V

Por ejemplo, para una tensión de funcionamiento máxima  $V_{DSMAX}$  de 40 V y una longitud de rejilla de 150 nm, es preciso realizar:

$$[Fs_{opt}] = (1 \pm 0,3) \times 10^{13} \times 40 \text{ V} / 150 \text{ nm,}$$

es decir aproximadamente  $(2,7 \pm 0,8) \times 10^{12}$  cargas fijas/cm<sup>2</sup>,

En los tres ejemplos siguientes, se plantea en caso en el que  $\Delta \ll 0$  sea  $\Delta < 10^{12}/\text{cm}^2$  (caso más favorable desde el punto de vista de dispersión de la señal). Se toma también  $t = 40 \text{ nm}$ , y  $[Fv] = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  respectivamente es decir  $[A] = [Fv] \cdot t = 4 \times 10^{12} \text{ cm}^2$ .

- 5 La relación 1 se puede escribir en dos formas equivalentes según el parámetro, longitud de rejilla o tensión máximo de funcionamiento, que se busca optimizar:

Si este es la tensión, tenemos:

$$V_{\text{MAX}} = L_g \times ([Fv] \cdot t) / ((1 \pm 0,3) \times 10^{13}) \quad (\text{relación n}^\circ 2)$$

Si este es la longitud de rejilla, entonces:

10 
$$L_g = V_{\text{MAX}} \times ((1 \pm 0,3) \times 10^{13}) / ([Fv] \cdot t) \quad (\text{relación n}^\circ 3)$$

-Aplicación telecomunicación espacial a 30 GHz:

En estas aplicaciones, la longitud de rejilla está comprendida entre 50 nm y 150 nm. Se utiliza la relación n°2, y encontramos:

- 15 - para una longitud de rejilla  $L_g = 50 \text{ nm}$ :  $V_{\text{MAX}} \ll 15 \text{ V}$  a  $28 \text{ V}$   
 - para una longitud de rejilla  $L_g = 150 \text{ nm}$ :  $V_{\text{MAX}} \ll 45 \text{ V}$  a  $85 \text{ V}$

-Aplicación en conmutación del tipo "envelope tracking":

En este caso se puede tener la rejilla más corta posible (tiempo de conmutación más corto) que puede funcionar a 60 V. Se utiliza la relación n°3 y se obtiene:

20 
$$L_g = V_{\text{MAX}} \times (1 \pm 0,3) \times 10^{13} / ([Fv] \cdot t) = 60 \times (1 \pm 0,3) \times 10^{13} / (4 \times 10^{12})$$
  

$$\approx 100 \text{ nm a } 200 \text{ nm}.$$

-Aplicación en conmutación de potencia para el automóvil:

En este caso se quiere mantener tensiones de 650 V a 1300 V. La longitud de rejilla debe ser, por lo tanto, del orden de:

25 - Para 650 V:  

$$L_g = V_{\text{MAX}} \times (1 \pm 0,3) \times 10^{13} / ([Fv] \cdot t) = 650 \times (1 \pm 0,3) \times 10^{13} / (4 \times 10^{12})$$
  

$$\approx 1 \mu\text{m a } 2 \mu\text{m}.$$

- Para 1300 V:  

$$L_g = V_{\text{MAX}} \times (1 \pm 0,3) \times 10^{13} / ([Fv] \cdot t) = 1300 \times (1 \pm 0,3) \times 10^{13} / (4 \times 10^{12})$$
  

$$\approx 2 \mu\text{m a } 4 \mu\text{m}.$$

- 30 El apilamiento según la invención es compatible con la utilización de una capa tampón 12 compuesta, que comprende una primera capa tampón a base de material GaN y una segunda capa tampón a base de material AlGaIn. Se indica 50 la interfaz entre GaN y AlGaIn (véase la figura 5). La presencia de una zona Vf según la invención permite disminuir el porcentaje de aluminio en el material AlGaIn, por ejemplo por debajo del 5 %, con como ventaja reducir el aumento de la resistencia térmica de esta segunda capa tampón.

- 35 Según una variante preferida ilustrada en la figura 13 la zona Vf está comprendida en la primera capa tampón.

Según otra variante, la zona Vf está comprendida en la segunda capa tampón.

Según otra variante, la zona Vf comprende la interfaz 50.

REIVINDICACIONES

1. Apilamiento (10) según un eje z para transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica, que comprende:

- una capa tampón (12) que comprende un primer material semiconductor que comprende un compuesto binario o ternario o cuaternario de nitruro y que presenta una primera banda prohibida,
- 5 - una capa barrera (13) que comprende un segundo material semiconductor que comprende un compuesto binario o ternario o cuaternario de nitruro y que presenta una segunda banda prohibida,
- siendo la segunda banda prohibida superior a la primera banda prohibida,
- una heterounión (15) entre dicha capa tampón (12) y dicha capa barrera (13) y,
- 10 - un gas bidimensional de electrones (9) localizado en un plano xy perpendicular al eje z y en las inmediaciones de la heterounión (15),

en el que:

- dicha capa tampón (12) comprende una zona (Vf) que comprende cargas negativas fijas (Fv) de densidad volúmica ([Fv]) superior o igual a  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , presentando dicha zona (Vf) un espesor (t) inferior o igual a 200 nm, **caracterizado porque:**
- 15 estando el producto de la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) por el espesor (t) de la zona (Vf) comprendido entre  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  y  $3.10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , obteniéndose dichas cargas fijas a partir de impurezas de tipo aceptor (A) introducidas en dicha capa tampón.

2. Apilamiento según la reivindicación 1, en el que las impurezas de tipo aceptor son de carbono o de hierro o de magnesio.

20 3. Apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la densidad superficial de cargas negativas fijas  $\int_0^t [A^-] \cdot dz$  es sustancialmente igual a la densidad superficial de impurezas de tipo aceptor  $\int_0^t [A] \cdot dz$  introducidas en la zona Vf de la capa tampón (12).

25 4. Apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) es superior o igual a  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , el espesor (t) de la zona (Vf) es inferior o igual a 40 nm, el producto de la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) por el espesor (t) de la zona (Vf) es inferior o igual a  $4.10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , y la distancia (d) de la zona (Vf) a la heterounión (15) es inferior o igual a 40 nm.

5. Apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el primer material semiconductor comprende GaN.

30 6. Apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el segundo material semiconductor comprende AlN, AlGaN, InAlN, InGaAlN o BAIGaN.

7. Apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) presenta un perfil, según el eje z, en forma de almena.

35 8. Apilamiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) presenta un perfil, según el eje z, trapezoidal que presenta una primera pendiente creciente y después un valor constante y después una segunda pendiente decreciente.

9. Apilamiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) presenta un perfil, según el eje z, en forma de campana.

40 10. Apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la capa tampón (12) es compuesta, comprendiendo una primera capa tampón a base de material GaN y una segunda capa tampón a base de material AlGaN, estando dicha zona (Vf) comprendida en la primera capa tampón.

11. Transistor con efecto de campo de alta movilidad electrónica realizado a partir de un apilamiento según una de las reivindicaciones anteriores.

12. Transistor según la reivindicación 11, que presenta una longitud de rejilla (Lg) en el que la distancia (d) a la heterounión de la zona (Vf) es inferior o igual a la longitud de rejilla (Lg).

45 13. Transistor según una de las reivindicaciones 11 o 12, en el que el producto de la densidad volúmica de cargas negativas fijas ([Fv]) por el espesor (t) de la zona (Vf) cumple la siguiente relación:

$$[Fv] \cdot t = (1 \pm 0,3) \times 10^{13} \times V_{DSMAX} / Lg$$

en la que:

Lg es la longitud de rejilla del transistor, en nm

$V_{DSMAX}$  es la tensión máxima aplicada entre la fuente y el drenaje del transistor, en Voltios, [Fv].t se expresa en  $cm^{-2}$ .

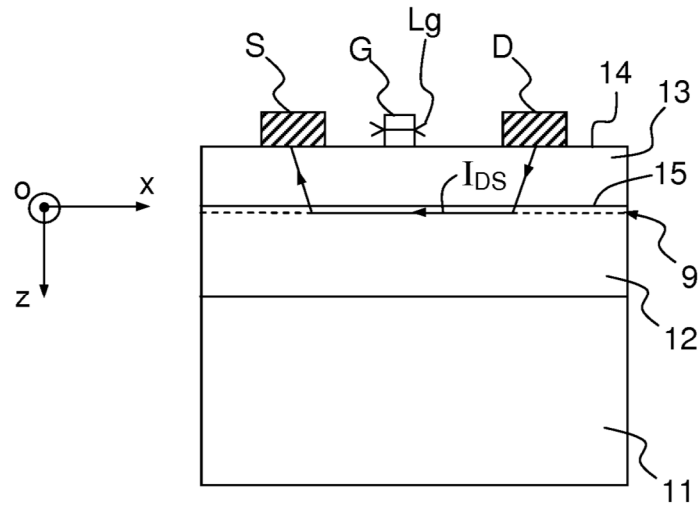


FIG.1

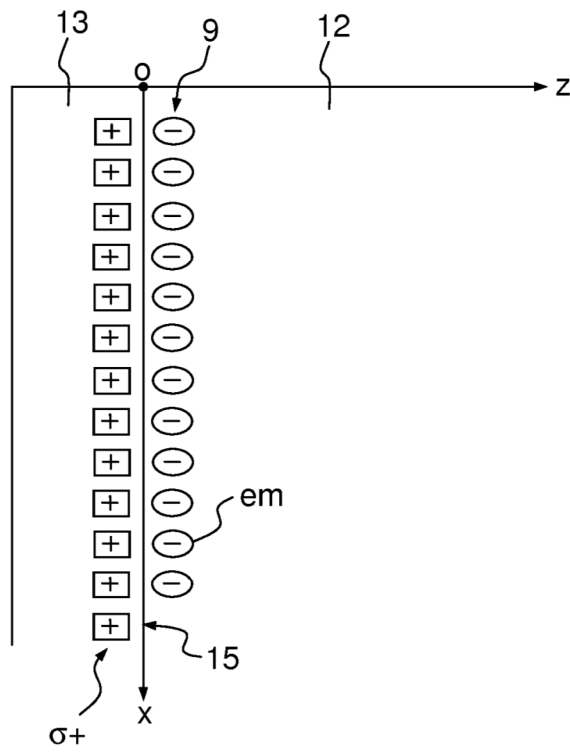


FIG.2

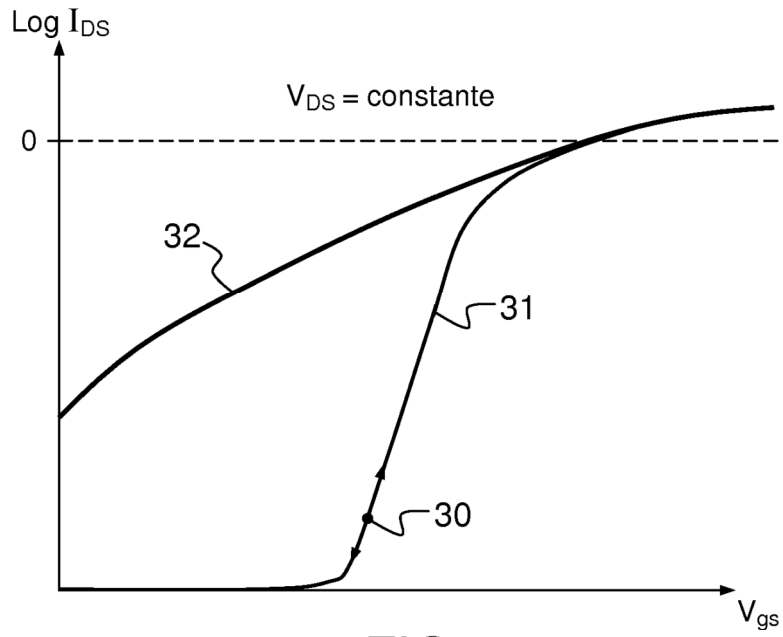


FIG.3

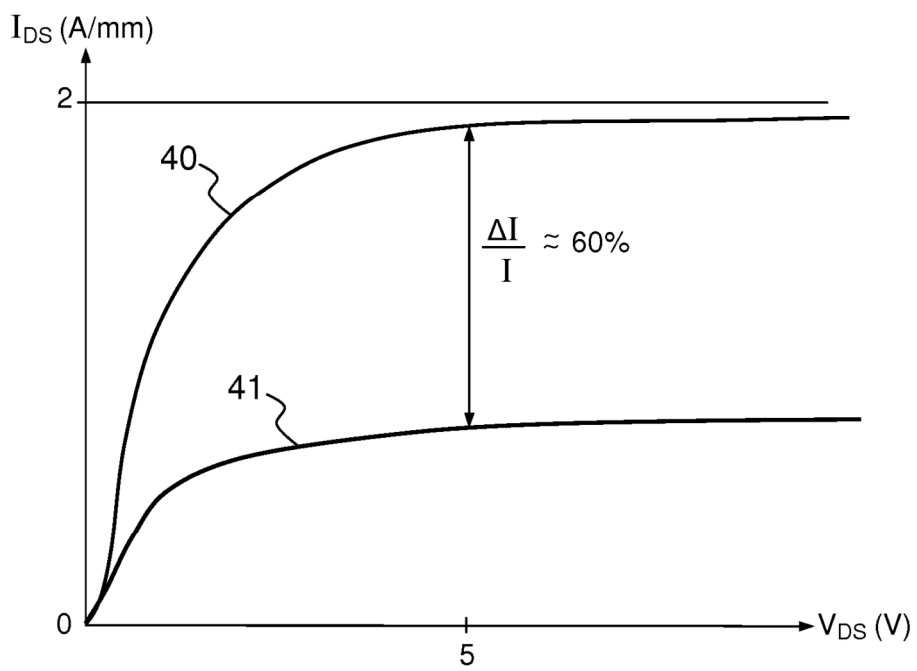


FIG.4

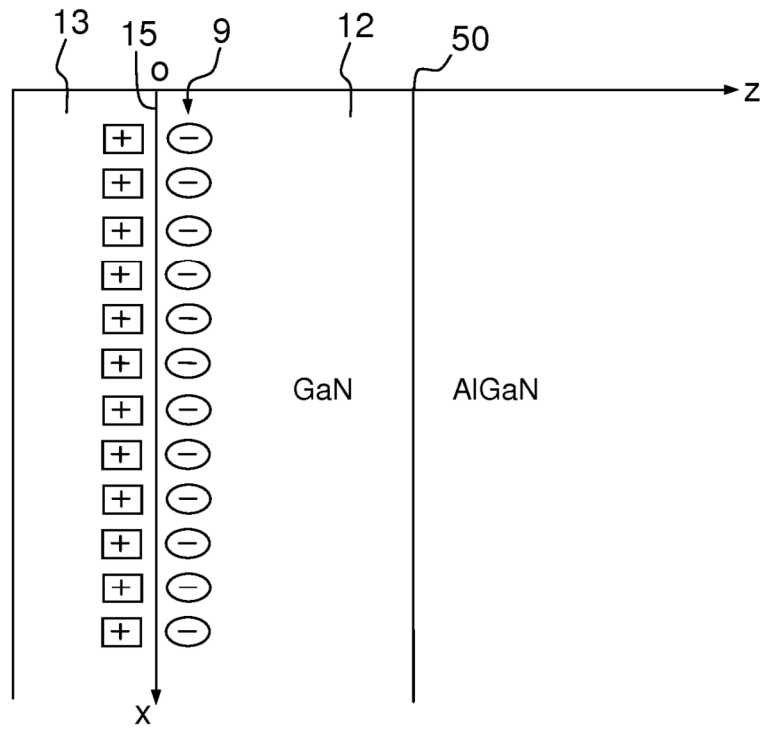


FIG.5

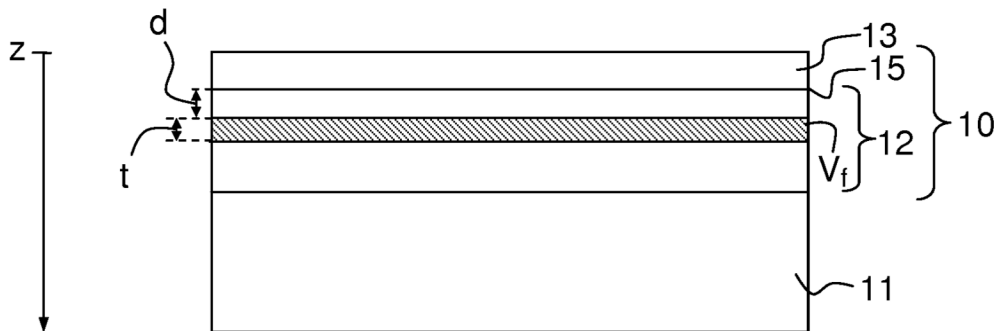


FIG.6

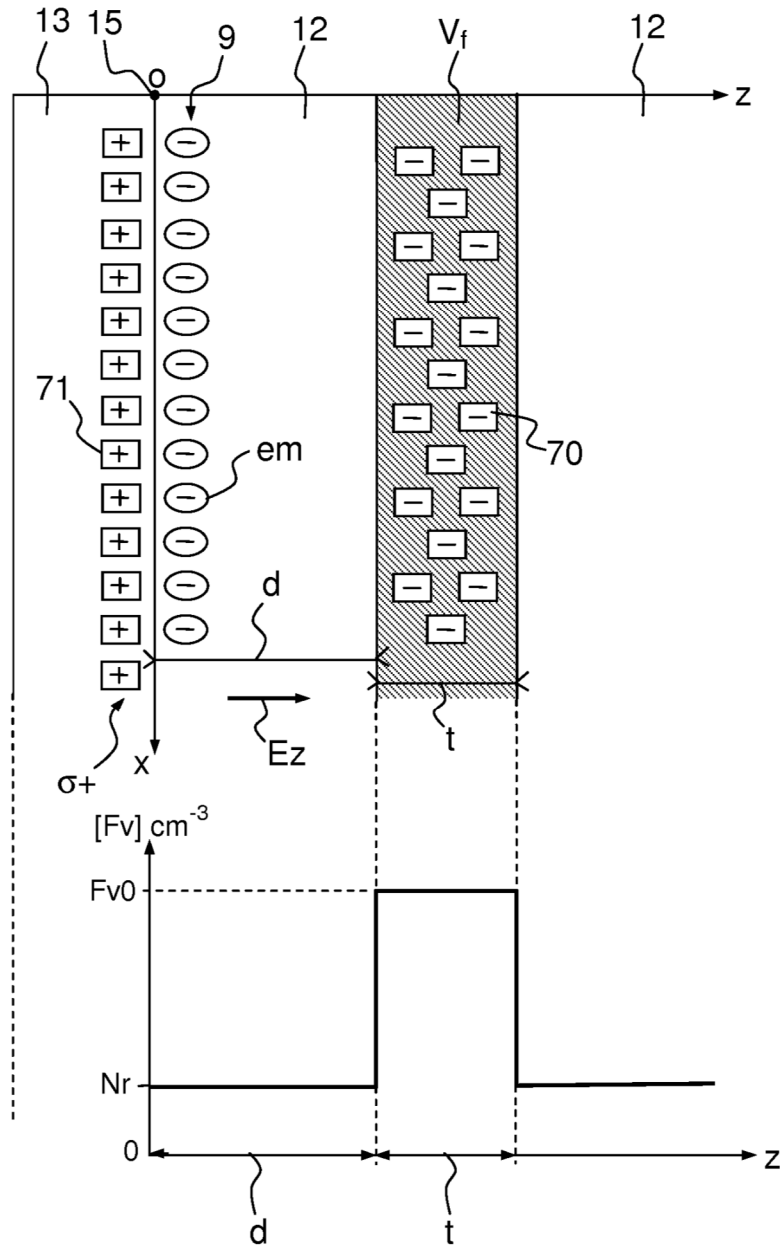
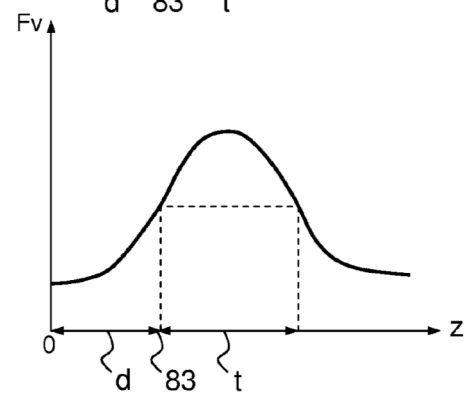
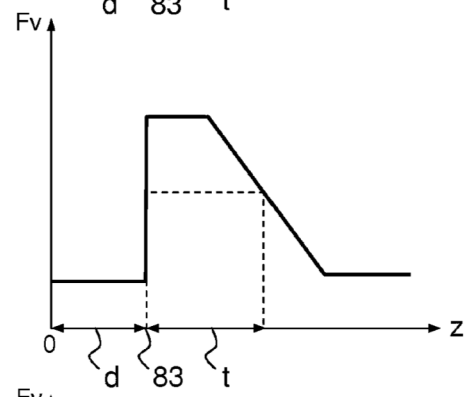
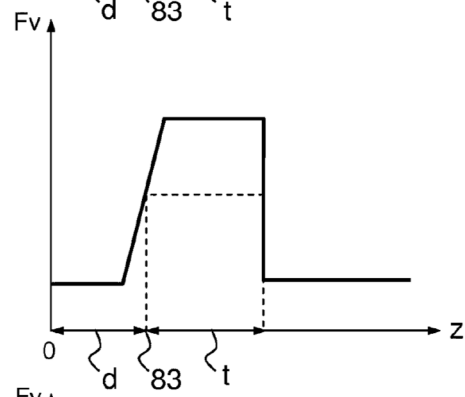
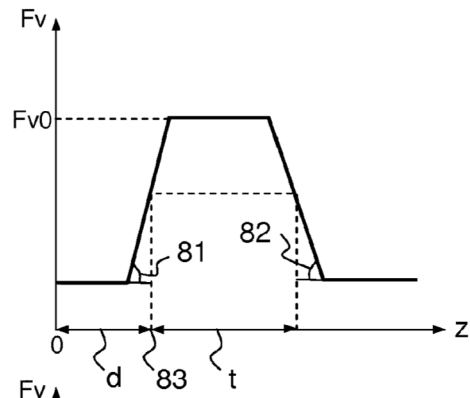
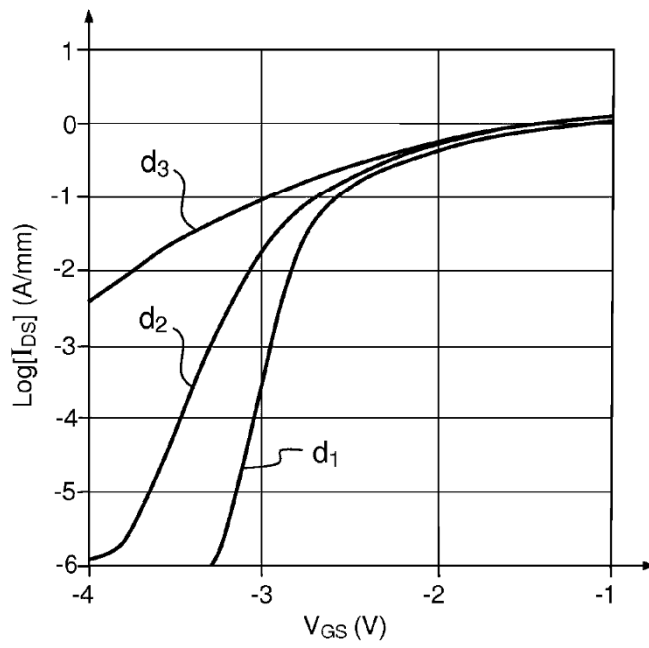
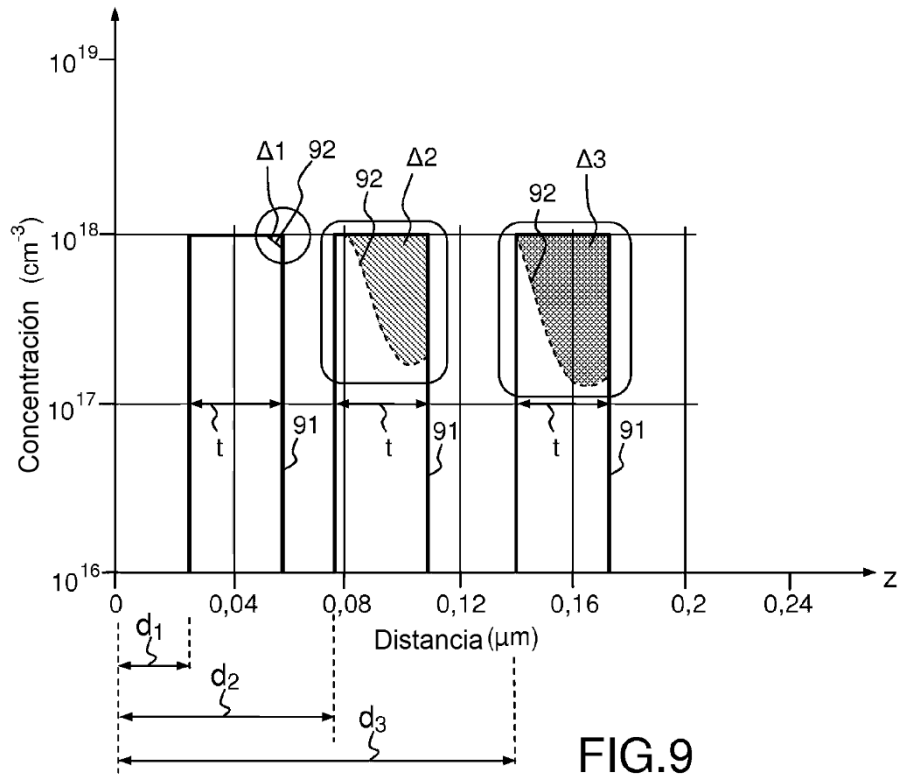


FIG.7







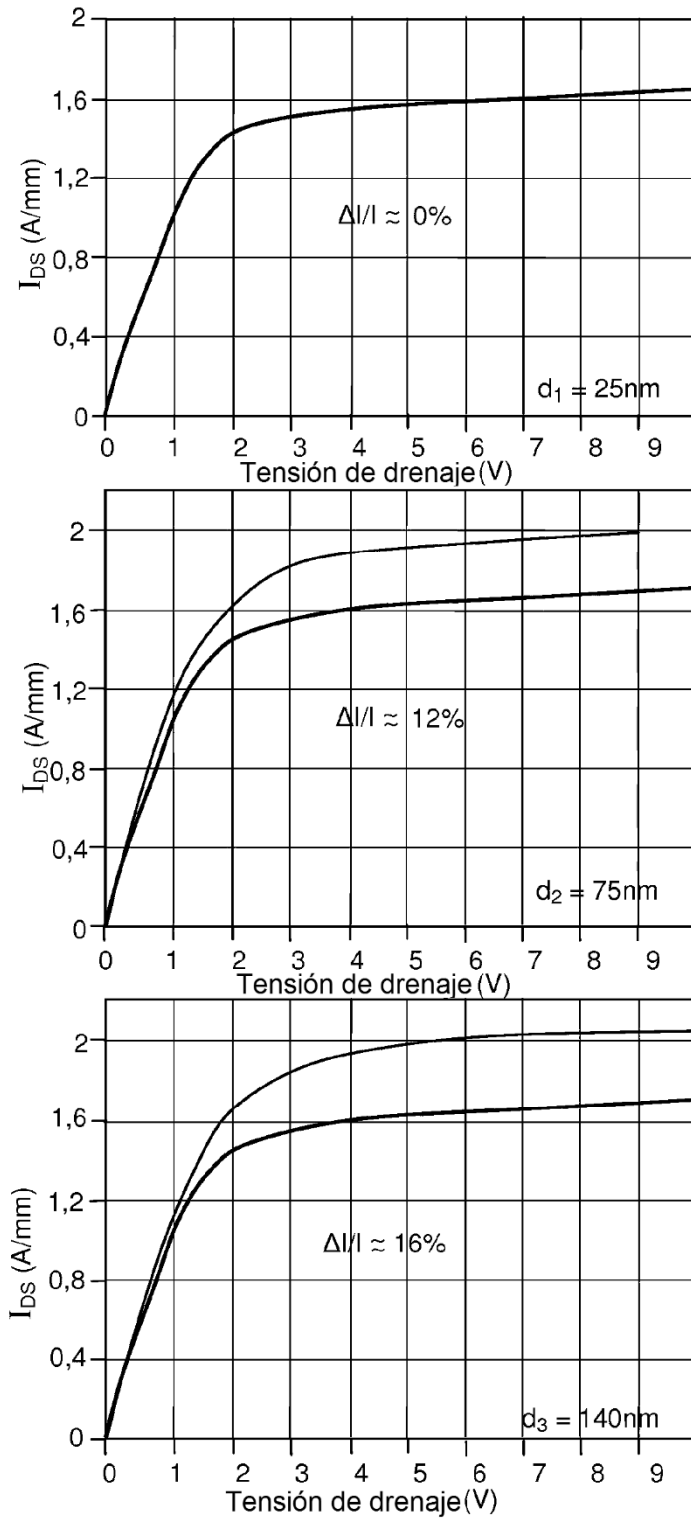


FIG.11

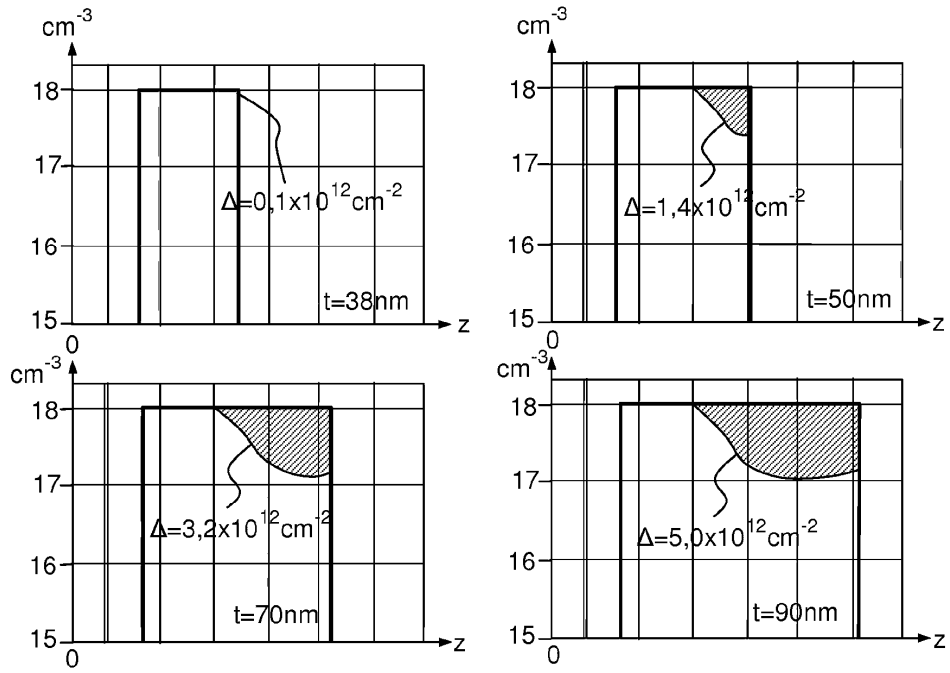


FIG.12

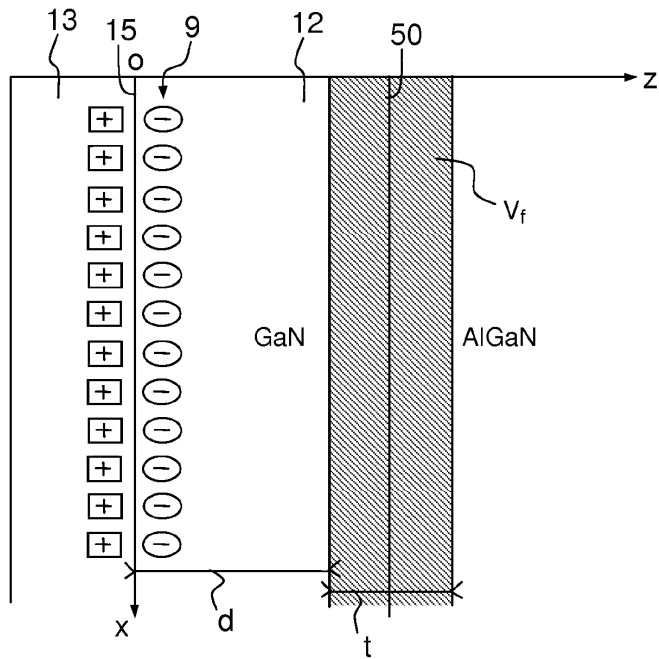


FIG.13